

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.186>



琼东南盆地松南低凸起周缘花岗岩 潜山储层特征及控制因素

徐守立, 尤 丽, 毛雪莲, 钟 佳, 吴仕玖

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘 要: 研究花岗岩潜山储层特征及控制因素为琼东南盆地下一步潜山勘探提供依据, 综合已钻井录井资料、壁心资料、测井资料、薄片资料及地球化学资料, 识别风化壳并刻画储层特征。研究结果表明松南低凸起及周缘花岗岩受长期风化影响, 纵向分带明显, 由表及里依次发育粘土风化带、砂砾质风化带、裂缝带和基岩带。通过元素测井、成像测井、常规测井结合可以很好的识别潜山风化壳及纵向结构特征。纵向上不同风化层储集空间特征显著差异, 依次发育孔隙型、裂缝-孔隙复合型、孔隙-裂缝复合型及裂缝型 4 种储集空间, 以裂缝-孔隙型储集为主的砂砾质风化带物性最好, 自砂砾质风化带以下, 随埋深增加, 风化减弱, 储层物性依次变差。松南低凸起周缘花岗岩侵入体形成于三叠纪初期, 自燕山期构造抬升, 长期古隆起暴露、断裂及节理发育是其厚层优质风化壳型潜山储层发育的主要原因。同时, 由于潜山后期埋深浅, 经过压实、胶结等成岩作用影响弱, 是凸起周缘潜山储层发育的重要原因。为下一步潜山领域勘探提供地质支撑。

关键词: 花岗岩潜山; 风化结构; 储层特征; 石油地质; 琼东南盆地。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)08-2717-12

收稿日期: 2019-02-11

Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Granite Buried Hill in Songnan Low Uplift, Qiongdongnan Basin

Xu Shouli, You Li, Mao Xuelian, Zhong Jia, Wu Shijiu

Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: Study the reservoir characteristics and controlling factors of granite buried hill as the basis for further exploration of buried hill in Qiongdongnan Basin. Reservoir characteristics are studied by combining with Logging data, sidewall core, microphotograph, and geochemical data. It's found that the granite of Songnan low uplift was affected by long-term weathering and the vertical zoning is obvious. Clay weathering zone, gravel weathering zone, fracture zone and fresh bedrock zone are developed from the surface to the inside. The characteristics of basement weathering crust and longitudinal structure can be well identified by combining element logging, imaging logging and conventional logging. The Reservoir space characteristics of different weathering layers are significant differences. Four types of reservoir spaces are successively developed: pore, fracture-pore complex, pore-fracture complex and fracture type, The sandy gravel weathering zone dominated by fracture-pore reservoirs has the best physical properties. Below the sandy gravel weathering zone, as the burial depth increases, weathering weakens and reservoir physical properties deteriorate in turn and the reservoir physical properties getting worse. Long-term Paleo-high background and Faults development because of stress concentration release around Songnan low uplift, Thick weathering crust is developed. Shallow burial and weak diagenetic remake is the main reason for the development of weathering crust reservoir. Providing geological

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2016ZX05026-002); 中海石油(中国)有限公司湛江分公司自有科研项目(No. ZYKY-2018-ZJ-01)。

作者简介: 徐守立(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事沉积储层方面的研究。ORCID: 0000-0002-7226-2662. E-mail: xushl4@cnooc.com.cn

引用格式: 徐守立, 尤丽, 毛雪莲, 等, 2019. 琼东南盆地松南低凸起周缘花岗岩潜山储层特征及控制因素. 地球科学, 44(8): 2717-2728.

support for further exploration in buried hill area.

Key words: granite buried hill; weathering structure; reservoir characteristics; petroleum geology; Qiongdongnan Basin.

0 引言

花岗岩潜山油气藏作为油气勘探新领域,随着勘探深入,越南、利比亚、委内瑞拉、印度等相继发现大型花岗岩基岩油气田(潘建国等,2007),开辟了潜山油气勘探新领域,因此,基岩油气藏逐步得到国内外地质学家的重视(马龙等,2006).琼东南盆地前古近系基底潜山储层研究匮乏,缺乏可借鉴的成功经验,前期勘探实践显示,基底潜山局部有明显油气显示,但储层物性纵横向变化大,非均质性强,有效性差,并未作为目的层引起足够重视.松南低凸起 YLB-A 井的钻探成功,证实盆内具有发育大型优质基底潜山型储集条件,以此为契机,针对凸起及周缘潜山储层特征及控制因素研究,以期推广应用,为下一步潜山领域的勘探提供地质支撑.但目前工程地质针对基岩风化壳的研究相对深入(尚彦军等,2001,2008),而相关基岩风化壳储层的研究,尤其相关花岗岩基岩风化壳的文献报道较少(黄建红等,2016),国外典型的有越南巽他盆地白虎油田(吴伟涛等,2014),储集空间以构造作用主控的裂缝型储层为主,顶部的风化壳,由于埋深大,经历强成岩改造,岩性致密,可作为下伏潜山的盖层(周宗良等,2009;张雨晴等,2016);近年来,国内渤海盆地蓬莱 9-1(邓云华,2015;薛永安等,2015;夏庆龙,2016;胡志伟,2017;苟琪钰等,2019)及柴达木盆地东坪地区在花岗岩基岩风化壳中取得重大突破(吴颜雄,2014;付锁堂等,2016;黄建红等,2016),发现大型油气田,为花岗岩潜山型储层纵向结构、储集空间变化特征及控制因素研究提供典型的案例.

勘探实践表明,花岗岩潜山储层相比碎屑岩储层非均质性极强,大地构造背景、地形、岩石类型、风化溶蚀及后期埋藏成岩改造等多因素控制有效储层发育及展布.本文在对比国内蓬莱 9-1 基础上结合区域地质背景、壁心资料、测井资料及地球化学资料,明确琼东南盆地松南低凸起花岗岩潜山储层特征及控制因素,为后期琼东南盆地花岗岩潜山储层勘探打下基础.

1 区域地质概况

琼东南盆地位于海南岛东南与西沙隆起区之间的海域,是南海北部深水区油气勘探的主战场之一,其西以 1 号断层与莺歌海盆地分开,东北以神狐隆起与珠三凹陷相隔,呈 NE 向延伸,盆地从北向南依次划分为北部坳陷、中部隆起、中央坳陷、南部隆起 4 个一级构造单元,水深最大超过 3 200 m(王振峰等,2011),位于深水区的中央坳陷存在陵南低凸起和松南低凸起 2 个正向构造单元(图 1),与乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷相接,呈现多凹环抱之势,是油气主要运聚方向(何家雄等,2006;朱伟林等,2015).

琼东南盆地是在前第三系基底上发育的典型新生代陆缘拉张型盆地(张功成等,2010),受中生代太平洋板块对欧亚板块俯冲影响,岩浆活动强烈,盆内形成广泛分布的侵入岩和火成岩(岳军培等,2013),中部隆起带松涛凸起 Y9 井及崖城凸起均有多井钻遇花岗岩基底,锆石同位素测年主要分布 110 Ma 左右,形成于白垩纪.后经历新生代时期裂隙阶段、裂后热沉降阶段及加速沉降阶段改造,新生代地层具有明显的下断上坳的双层结构(解习农等,2011),自下而上依次发育始新统岭头组、渐新统崖城组和陵水组,中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新世的莺歌海组及第四系地层.研究区松南低凸起前第三系基底与渐新统崖城组砂砾岩呈不整合接触,缺失始新统岭头组地层,其上崖城组砂砾岩与三亚组海相泥岩呈不整合接触.三亚组泥岩可作为良好的区域盖层.

2 花岗岩潜山储层分带特征

2.1 储层垂向分带

花岗岩属于致密坚硬的岩石,抗风化能力强,但由于节理发育、性脆,在强构造应力及风化破碎作用下,地表水可广泛渗入,加速风化淋滤进程,形成厚层风化壳,随深度增加,风化作用逐渐减弱,纵向具有明显的分带性(黄建红等,2016).本次借鉴国内外典型花岗岩潜山储层勘探经验,综合壁心、薄片鉴定、岩屑录井、测井、全岩分析及粘土 X 衍射

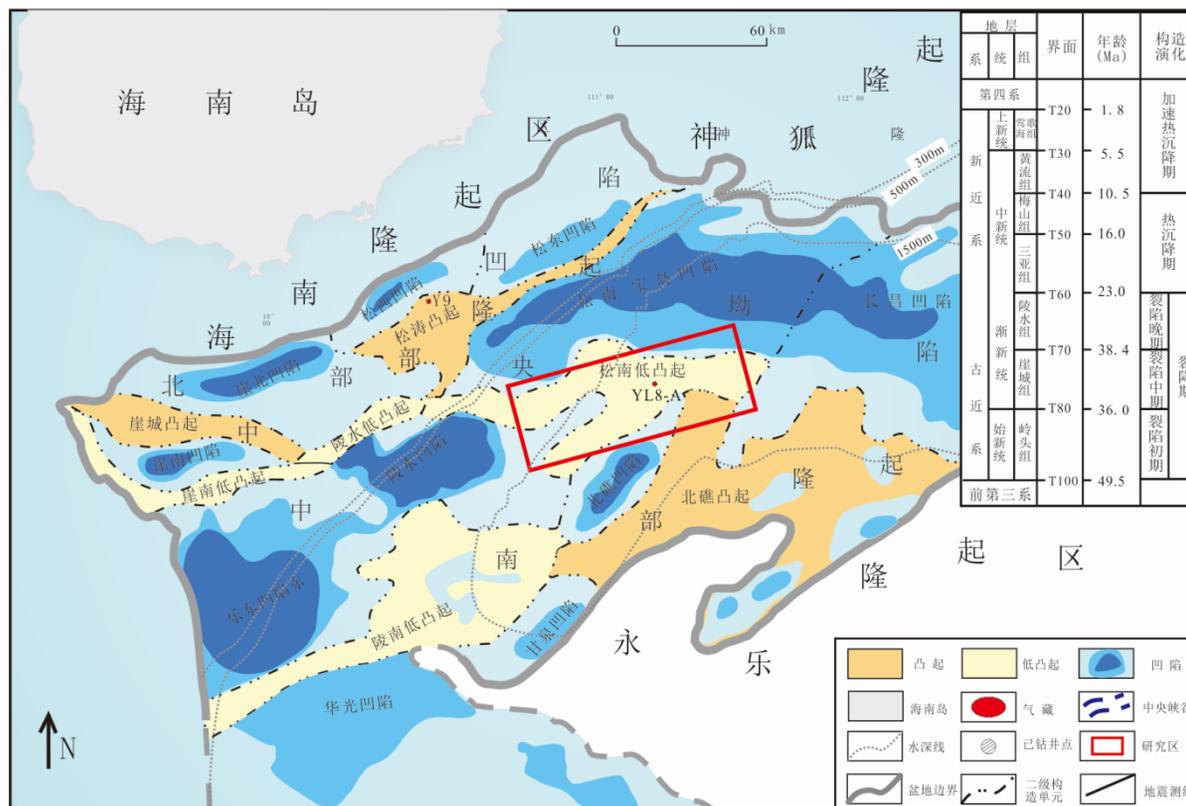


图 1 琼东南盆地构造单元划分
Fig.1 Tectonic division of the Qiongdongnan Basin

等资料综合分析,将琼东南盆地松南低凸起周缘花岗岩潜山由表及里垂向分为粘土风化带、砂砾质风化带、裂缝带和基岩带。花岗岩的风化作用由表及里逐次推进,粘土风化带及砂砾质风化带纵向层面很难明确确定,如图3(Y9井及蓬莱9区),由于较强的风化作用,整体呈现低密度特征,电阻率随埋深增加呈现增高趋势(图3),YLB-A井结合测井响应特征、物性特征进一步将划分粘土风化带及砂砾质风化带。

粘土风化带,位于花岗岩潜山顶部,由于长期暴露遭受大气淡水淋滤,花岗岩结构被强烈破坏,长石等不稳定矿物已经全部风化成松散粘土矿物,石英等残余颗粒呈“漂浮”状分布其中,呈无基岩骨架特征(图4b),粘土X衍射分析显示,粘土类型以高岭石、伊利石及绿泥石为主(图2),偶见残余角砾,灰色或红褐色(图4a)。

砂砾质风化带,紧邻粘土风化带,花岗岩主要由长石和石英组成,受两者膨胀系数差异(王昕等, 2015),在冷结晶过程中产生裂缝,多形成3组节理,3个方向节理把岩体切割成大小不一的立方体,起初棱角分明,在大气淡水长期淋滤下,棱角逐渐

缩减,最终变为球状,在长期风化作用下,已失去花岗岩结构,呈砂砾状结构,主要由石英、花岗岩块和粘土组成,局部粘土矿物充填粒间孔隙(图4d),未被粘土矿物充填则发育粒间孔隙。粘土风化层及砂砾质风化层,经历长期的风化作用破坏,后期埋深浅,压实等成岩作用影响弱,岩性松散,层间速度相对较慢,层间速度2 624 m/s左右,壁心收获率28%,仅收获3颗破碎样。

裂缝带,主要由花岗岩组成(图4e),裂缝发育,大气淡水主要沿裂缝进行淋滤,壁心观察裂缝段顶部岩石破碎,随埋深增加风化作用逐渐减弱,密度逐渐增加,呈致密高电阻率特征,由于风化减弱,粘土矿物类型突变为伊利石为主(图2)。通过YLB-A井与Y9井及蓬莱地区对比可见具有明显的相似性(图3),裂缝带顶部由于较强的风化作用物性较好,呈低电阻,低速度高声波时差,随着埋深增加,风化作用减弱,裂缝充填一半充填(图4f),致密坚硬,呈现高电阻率、高速度低声波时差特征。底部裂缝呈半充填—开启状(图4h),密度及电阻率呈略有降低趋势。

基岩带,岩石致密坚硬,裂缝基本不发育(本井

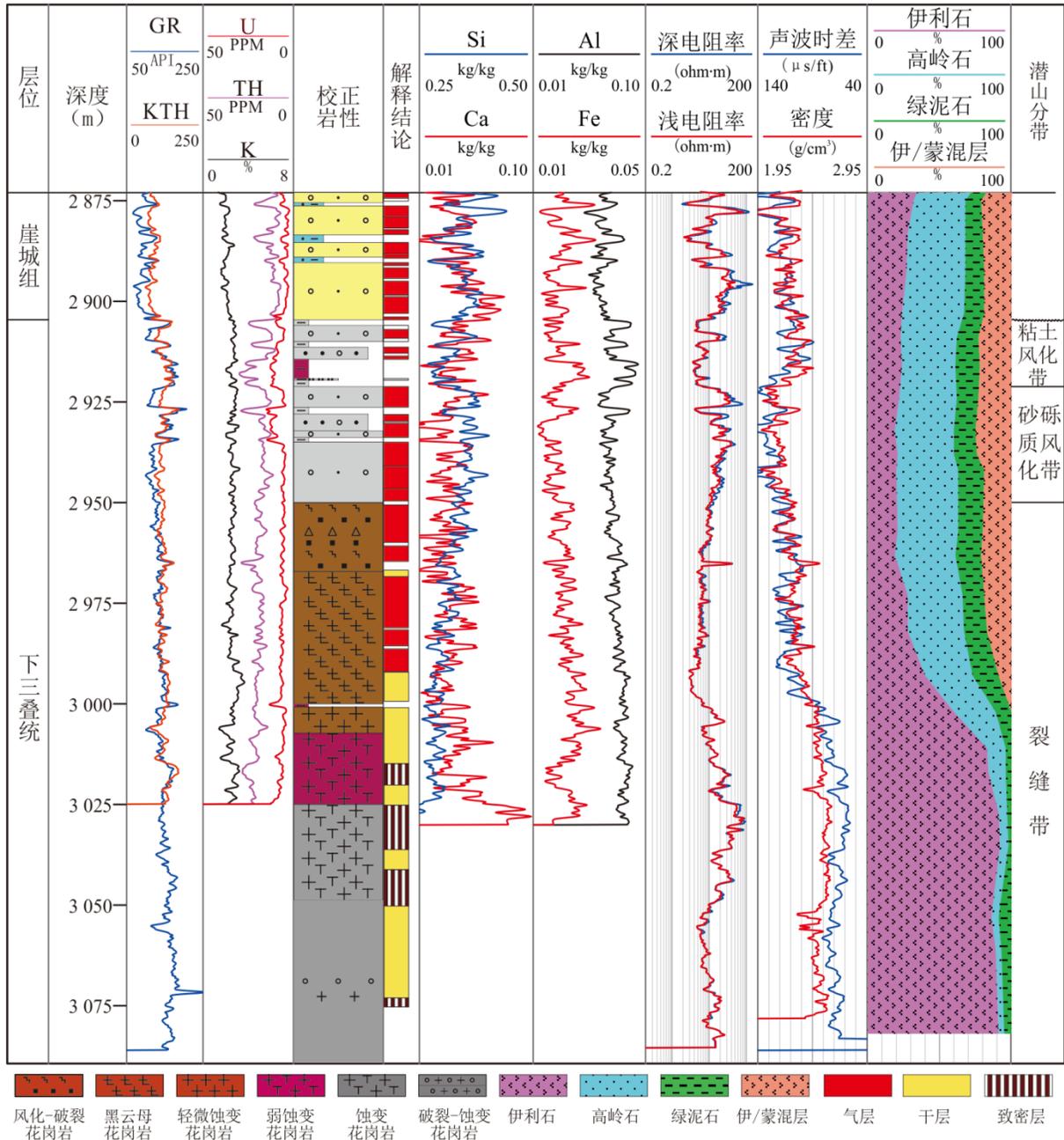


图 2 YLB-A 井基底潜山储层测井响应特征及粘土矿物纵向分布

Fig.2 Logging Response Characteristics and longitudinal distribution of clay minerals in Granite Buried Hill Reservoir of YLB-A

尚未钻遇)。

2.2 纵向测井响应特征

(1)元素测井响应特征. 风化壳经历复杂的地质演变过程,与母岩既有继承性又有变异性,气候及风化暴露时间决定风化壳的矿物成分变化,花岗岩经历长期的风化淋滤,由于各矿物抗风化稳定能力差异,首先是原生铝硅酸盐矿物向粘土矿物转化(徐国盛等,2016),析出 Na、Mg、Ca、Si、Al 等元素(胡志伟,2017),易迁移的碱及碱土金属元素(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)不断流失亏损,Si⁴⁺及 Al³⁺被水解

成 SiO₂ 和 Al₂O₃ 胶体,Si⁴⁺ 以 SiO₂ 胶体形式流失,Al³⁺ 以粘土矿物存在,不断富集(马晓晨,2018). 含铁地下水与氧气接触,使 Fe²⁺ 氧化成 Fe³⁺,进而水解生成 Fe(OH)₃,接着氢氧化铁分解为 Fe₂O₃(尚彦军,2001). 形成风化壳顶面元素地球化学呈现明显的脱硅富铝铁现象,通过地层元素测井(ESC)获取地层元素能够明显识别风化壳. 琼东南盆地松南低凸起 YLB-A 井钻探揭示,埋深 2 904.6 m 附近 Al、Fe 元素呈明显聚集,随着埋深增加,逐渐降低(图 2),Ca 等碱土金属元素及 Si 元素由于风化淋滤降

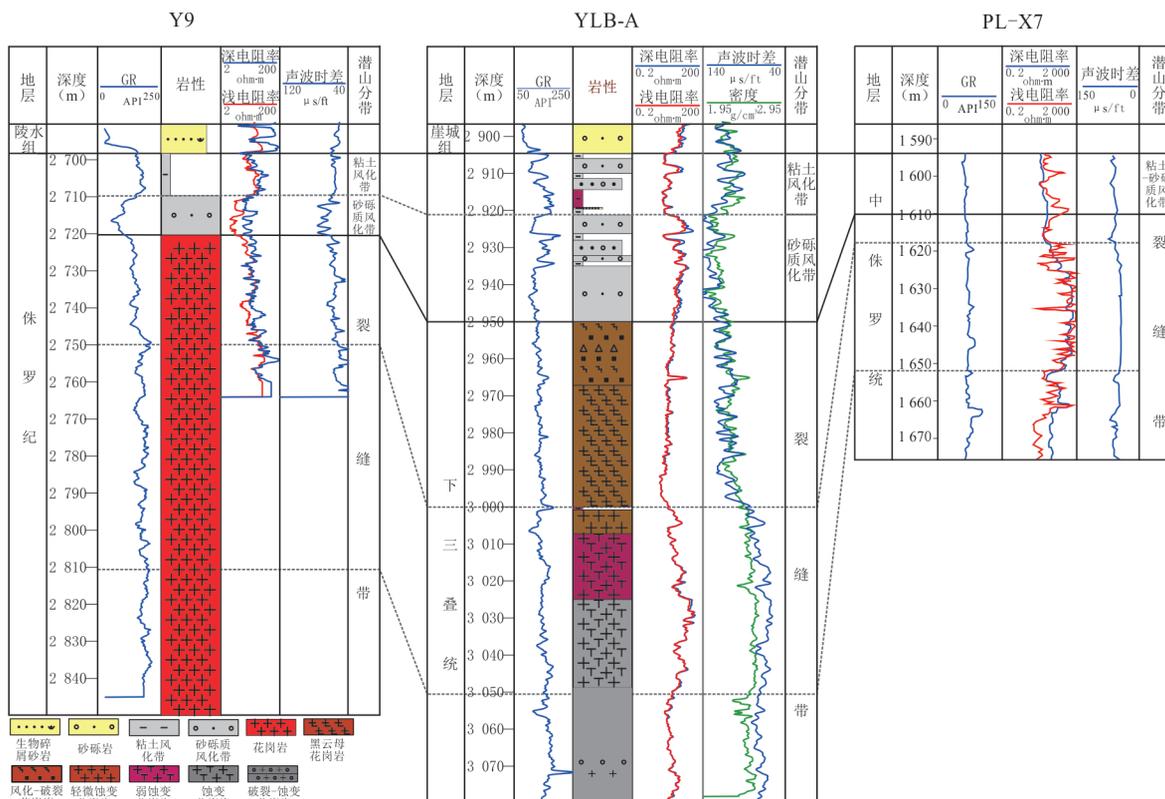


图 3 花岗岩潜山储层对比图
Fig.3 Contrast map of granite buried hill

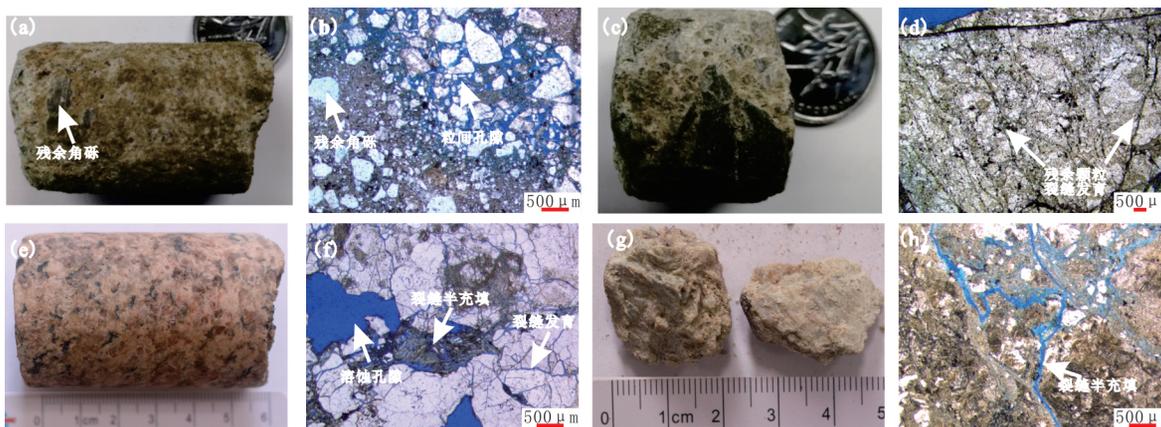


图 4 典型壁心及显微薄片照片

Fig.4 Typical photographs and Microphotographs of sidewall core

a. YLB-A 井, 2 909.6 m, 粘土矿物为主, 残余角砾零星分布; b. YLB-A 井, 2 909.6 m, 基质支撑, $\Phi=17.3\%$, $K=0.94$ mD; c. YLB-A 井, 2 947.0 m, 砂砾状结构; d. YLB-A 井, 2 947.0 m, 花岗岩角砾; e. YLB-A 井, 2 990.0 m, 黑云母花岗岩; f. YLB-A 井, 2 990.0 m, 黑云母花岗岩, $\Phi=8.3\%$, $K=12.5$ mD, 孔隙-裂缝型; g. YLB-A 井, 3 039.0 m, 蚀变花岗岩, 长石等不稳定矿物蚀变为粘土矿物, 壁心松散破碎; h. YLB-A 井, 3 039.0 m, 蚀变花岗岩, 裂缝型

低, 因此推测 2 904.6 m 进入风化壳。

(2) 常规测井及成像响应特征。花岗岩具有较高的放射性与沉积岩明显不同, 在自然伽玛能谱曲线上能很好区别, 琼东南盆地松南低凸起钻探揭示, 2 904.6 m 以下自然伽玛基值升高(图 2), 明显区

别于顶部崖城组碎屑砂砾岩储层, 与元素测井相互印证。同时, 花岗岩长期暴露地表遭受风化淋滤, 使得致密花岗岩变得松散, 而具有一定的储集性, 最终降低其密度。纵向上, 随着埋深增加, 不同的风化带, 受风化强度的差异, 储集性及密度也具有很好

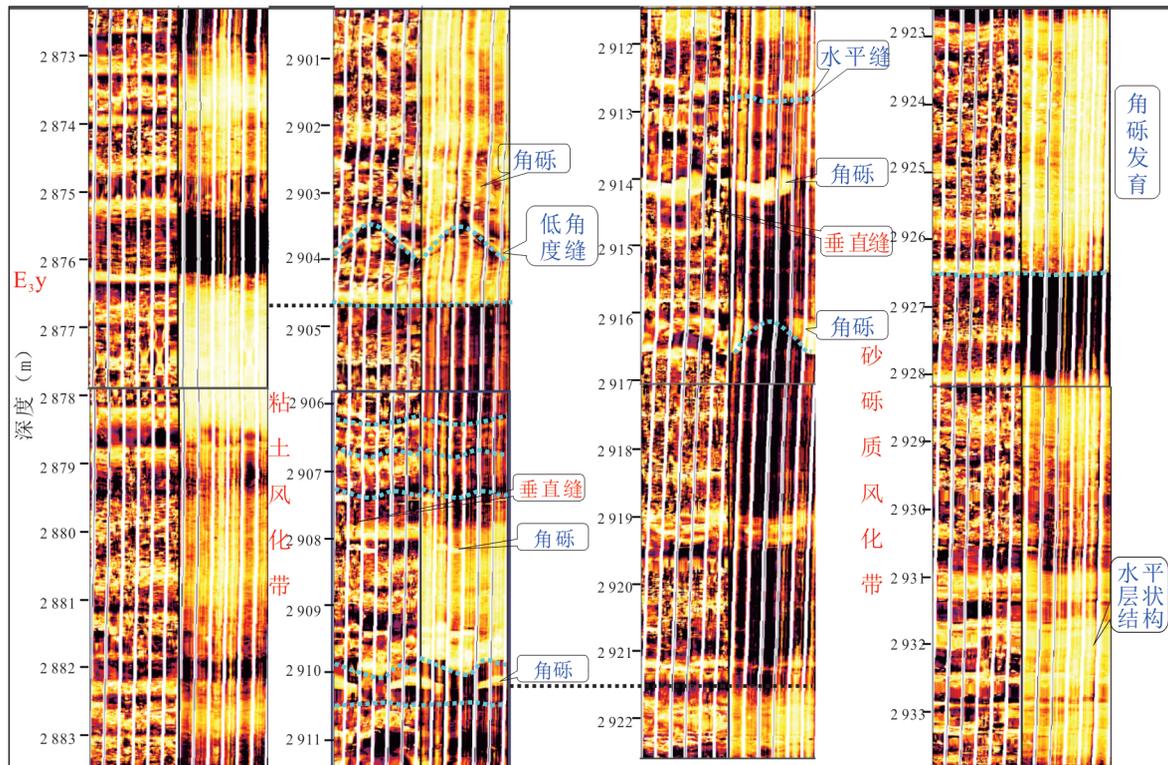


图5 潜山纵向结构及储集空间电成像特征

Fig.5 The imaging logging characteristic of longitudinal structure and reservoir space

的分带性,故通过常规测井曲线也可以很好地确定花岗岩风化壳及纵向结构。

粘土风化带,琼东南盆地松南低凸起 YLB-A 井钻探揭示,埋深 2 904.6 m 及以下,顶部粘土风化带,由于强烈的风化作用,长石等不稳定矿物风化为粘土矿物,表现为高伽玛,低电阻,相对高密度,高声波时差的测井响应特征,与顶部的古近系崖城组扇三角洲砂砾岩呈明显的突变接触。自然伽玛能谱显示粘土风化层具有明显高铀、钍特征,U 含量 $(4.2\sim 15.0)\times 10^{-6}$,平均 9.4×10^{-6} ,Th 含量 $(9\sim 30)\times 10^{-6}$,平均含量 18.3×10^{-6} ,明显较顶部崖城组扇三角洲砂砾岩高,砂砾岩 U 含量 $(2\sim 10)\times 10^{-6}$,平均含量 4.2×10^{-6} ;Th 含量 $(7.0\sim 21.8)\times 10^{-6}$,平均含量 11.4×10^{-6} (图 2)。成像测井静态图像 2 904.6~2 921.6 m 呈明显深色低阻块状相为主,局部发育浅色高阻亮斑,推测为基岩残留角砾,结合动态图显示为浅色高阻亮斑大小不一,与低阻暗斑混杂特征(图 5)。

砂砾质风化带,相对顶部粘土风化带,呈现相对低伽玛,高电阻,低密度,高声波时差特征(图 2)。该带即 2 921.6 m 以下,在成像测井静态图上显示以浅色高阻块状相为主,动态图像显示为明显的水平

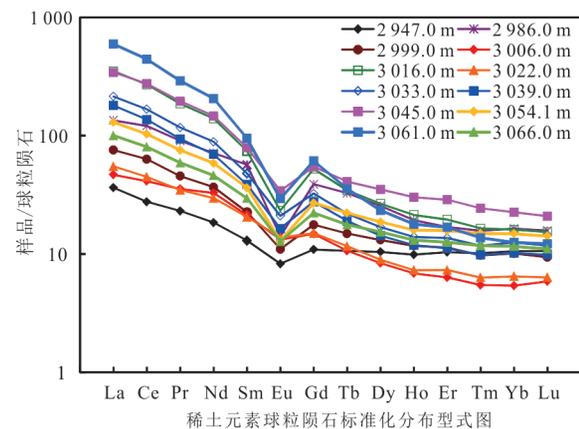


图6 松南低凸起花岗岩基底稀土元素球粒陨石标准化模式

Fig.6 Standardized model map of rare earth element chondrites of Granite basement, in Songnan low uplift

层状结构(图 5)。推测受构造抬升过程中差异风化作用影响(徐国盛等,2016)。

裂缝带,随着埋深增加,风化程度减弱,花岗岩结构未完全破坏,密度明显较顶部砂砾质风化带大,声波时差小,并且随着埋深增加密度有逐渐增加趋势(图 3),3 050 m 以下高层层底部推测由于晚期溶蚀改善,电阻率明显降低。

表1 松南低凸起花岗岩主要成分分布范围

Table 1 Distribution range of main components, in Songnan low uplift

深度 (m)	烧失 量 (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	全碱			分类	岩性 (TAS分类)
												含量 Na ₂ O + K ₂ O	里特 曼指 数σ	铝饱 和指 数		
2 947	7.1	61.55	13.02	7.47	3.35	2.69	0.79	0.09	3.40	0.02	0.52	6.09	2.00	0.59	偏过铝质	闪长岩
2 986	7.4	61.64	15.43	1.98	5.80	2.18	1.02	0.08	3.85	0.10	0.49	6.03	1.95	1.25	强过铝质	闪长岩
2 999	7.2	62.70	15.81	0.79	3.69	4.63	0.37	0.05	3.99	0.20	0.62	8.62	3.77	1.21	强过铝质	石英二长岩
3 006	9.9	56.26	20.37	1.19	4.35	4.33	1.19	0.04	0.53	0.59	1.28	4.86	1.78	2.64	强过铝质	辉长闪长岩
3 016	9.3	65.60	13.36	1.28	1.65	4.60	0.52	0.02	3.07	0.14	0.41	7.67	2.60	1.08	过铝质	石英二长岩
3 022	7.1	60.86	16.44	1.98	1.60	7.02	0.30	0.02	4.07	0.15	0.40	11.10	6.89	0.92	偏过铝质	正长岩
3 033	7.4	62.46	14.58	3.30	3.15	4.01	0.79	0.05	3.70	0.11	0.46	7.70	3.05	0.89	偏过铝质	石英二长岩
3 039	7.9	64.34	16.59	2.34	1.54	5.10	0.92	0.03	0.55	0.14	0.56	5.65	1.49	1.55	强过铝质	花岗闪长岩
3 045	8.3	62.63	14.54	3.51	3.45	4.84	0.92	0.05	1.31	0.13	0.29	6.15	1.93	1.05	过铝质	闪长岩
3 054	8.3	66.33	13.47	1.60	1.67	3.77	0.49	0.04	3.70	0.16	0.48	7.47	2.39	1.03	过铝质	石英二长岩
3 061	9.1	61.13	16.74	0.77	1.65	4.03	0.43	0.02	5.51	0.15	0.44	9.54	5.02	1.13	强过铝质	正长岩
3 066	9.6	66.97	11.38	1.89	2.75	3.76	0.67	0.05	2.46	0.12	0.37	6.22	1.61	0.98	偏过铝质	花岗闪长岩

3 花岗岩潜山储层特征

3.1 储层岩石学特征

上述研究表明松南低凸起岩浆岩侵入体经过后期构造抬升,暴露地表,遭受风化剥蚀,在长期的风化淋滤下,表层风化壳花岗岩原始结构严重破坏,具有似砂砾岩结构特征,随着埋深增加,风化作用减弱,花岗岩的原始结构得以保留,纵向上具有明显的分带性.综合裂缝带壁心、显微薄片观察等资料可见,纵向上岩相变化复杂,依次发育风化—破裂花岗岩、花岗斑岩、黑云母花岗岩、轻微蚀变花岗岩、蚀变花岗岩、破裂—蚀变花岗岩等(图2).根据YLB-A井基底元素地球化学分析可见松南低凸起基底SiO₂含量分布(56.3%~67.0%)平均为62.7%,为中—酸性岩浆岩,长石类型以钾长石及斜长石为主(图7),全碱(Na₂O+K₂O)含量为4.9%~11.1%平均为7.3%.铝饱和指数ACNK为0.6~2.6,平均值1.2,以过铝质—强过铝质为主,里特曼指数(σ)1.5~6.9,平均2.87,属于钙碱性—碱性系列.通过YLB-A井稀土元素分析,重稀土元素亏损,轻稀土元素明显富集特征(图6),有明显的负Eu异常.结合2 952~2 964 m,3 012~3 022 m,3 054~3 066 m,3个深度岩屑样品锆石定年分析获得年龄谱系以单峰为特征,分别为244 Ma,239 Ma,250 Ma,主要形成于三叠纪初期,与华南大陆三叠纪初期广泛发育的强过铝质的花岗岩一致(徐先兵等,

2009).

3.2 储集空间类型

琼东南盆地松南低凸起花岗岩潜山储层是典型的风化壳型储层,纵向上储层物性及储集空间特征具有明显的分带性.由浅入深依次发育孔隙型、裂缝—孔隙复合型、孔隙—裂缝复合型及裂缝型四类储集空间.

(1)孔隙型.孔隙型储层主要发育于粘土风化层(2 904.6~2 921.6 m),是风化带中遭受风化改造最强位置,由于强裂的风化作用,长石等不稳定矿物转化为粘土,无明显的骨架颗粒,实测孔隙度17.3%,渗透率仅有0.9 mD,测压取样估算流动性低,小于20 mD/CP,呈现明显的孔高渗低面貌,结合显微薄片,孔隙类型以溶蚀孔隙及粘土的基质微孔为主(图4b),孔喉连通性差(图7).

(2)裂缝—孔隙复合型.裂缝—孔隙复合型储层主要发育于砂砾质风化层(2 921.6~2 950.0 m),风化强度仅次于粘土风化层,强风化作用下,具有砂砾状结构,花岗岩角砾裂缝发育(图4d),电成像测井可见高阻的砾石发育,颗粒间相互支撑,粒间孔隙发育,电成像测井动态图像显示为深色低阻暗斑(图5),储集空间以孔隙型为主,局部发育水平裂缝及垂直微裂缝,储层物性较好,测井解释储层孔隙度12.8%~27.8%,加权平均孔隙度23.7%,测压取样估算流动性好,最高达1 908 mD/CP(图7).

(3)孔隙—裂缝复合型.孔隙—裂缝复合型储

层主要发育于裂缝带顶部(2 950~3 000 m),花岗岩致密性脆,在后期强构造应力作用下易产生裂缝,裂缝主要分为显微裂缝及微裂缝,其中显微裂缝主要发育于脆性矿物颗粒内,结合显微薄片观察,显微裂缝密度大,可明显改善储层渗透性(图版 4f);微裂缝规模明显较显微裂缝大,可贯穿整颗壁心,裂缝带中,裂缝占绝对主导地位,是裂缝带主要储集空间及渗流通道,大气淡水沿裂缝及周缘发生溶蚀,形成次生溶蚀孔隙(图版 4f),随着深度增加溶蚀作用减弱,物性逐渐变差,实测孔隙度 2.7%~17.8%,渗透率 0.1~13.9 mD,测压取样估算流动性 1.9~598.0 mD/CP,非均质性强。

(4) 裂缝型储层. 裂缝型储层主要发育裂缝带底部,远离表层风化壳,风化溶蚀弱,发育少量裂缝,岩石致密,呈现高速度,层间速度 4 924 m/s,低声波时差,高电阻率特征。

4 储层控制因素

琼东南盆地松南低凸起钻探揭示前古近系花岗岩储层发育受风化、构造多种作用改造,储层发育“裂缝+孔隙”双重介质,具有极强非均质性,物性纵向分带明显,自上而下有序分布. 粘土风化层以溶蚀孔及基质微孔为主,孔高渗低的特征;砂砾质风化层,储集空间以裂缝-溶蚀孔隙型为主,物性最好;裂缝带储集空间以溶孔-裂缝型为主,物性较砂砾质风化层差,有利储层的发育明显受地形、裂缝展布及后期成岩改造作用控制。

4.1 致密而性脆富长英质岩性是潜山风化壳储层发育的物质基础

风化壳发育程度、结构与母岩性质密切相关,区域研究认为琼东南盆地内凸起以花岗岩基底为主,局部发育安山玢岩、变质岩及流纹岩,盆地北缘神狐隆起以云母斜长混合岩及微变质流纹岩为主,崖南北缘发育碳酸盐岩基底. 不同区稀土元素也存在明显差异,盆地北缘神狐隆起云母斜长混合岩及微变质流纹岩以负斜异常到明显正斜异常,中部隆起带环崖南及周缘、松涛凸起花岗岩、变质岩基底以低幅正斜异常,南部隆起带花岗岩以低幅负斜异常为主. 推测盆地中部隆起及北部岩浆岩形成于岩浆早期富 Ca^{2+} 的环境中,形成富斜长石的正斜异常. 南部隆起花岗岩形成于岩浆演化晚期,由于岩浆中的 Eu 已经随斜长石析出,所以造成了 Eu 的负异常. 松南低凸起及周缘发育花岗岩基底,花岗岩

主要成分为石英、长石等矿物组成,其比热及膨胀系数不同,在冷凝过程中易产生多组节理,长石等易溶矿物在地下水及地表水作用下不断溶蚀,长时间的溶解作用,长石等蚀变成粘土矿物,石英等稳定矿物发生机械破碎,形成似砂砾状结构的深厚风化层. 因此,致密而性脆富长英质岩性是潜山风化壳储层发育的物质基础。

4.2 断裂发育是潜山风化壳优质储层发育的关键原因

构造活动形成的断裂性质及展布是控制基底潜山型储层发育的关键原因,研究区花岗岩主要为三叠纪初期侵入岩. 中侏罗世燕山运动初期,太平洋板块向华南大陆低角度俯冲挤压(张岳桥等, 2009),造成研究区区域隆升,遭受风化剥蚀,形成燕山早期至渐新世长期的暴露溶蚀. 新生代以来,琼东南盆地受太平洋板块、欧亚板块及印度洋板块共同作用影响,区域应力场逐渐由北西-南东向转变为近南北向顺时针旋转,发育多期次裂缝(唐历山等, 2017). 研究区松南低凸起位于琼东南盆地近东西向与北东向构造转换带处,断裂发育,形成 YLB-A 井区受断层夹持的地垒. 裂缝的发育加速花岗岩基底的风化淋滤进程,形成 40 余米的风化带,由于强风化作用花岗结构几乎全部破坏. 壁心观察可见底部蚀变主要沿裂缝发育,大气淡水沿断裂下渗,形成风化裂隙及溶蚀孔。

4.3 古隆起长期暴露大气淡水淋滤及有机酸溶蚀是有利储层发育主要原因

琼东南盆地多口钻遇基底潜山井统计,基底潜山主要属于白垩系、三叠系,分布于崖城低凸起、崖城 13-1 低凸起、松涛凸起及松南低凸起,上覆地层主要为崖城组、陵水组、三亚组,缺失古新统、始新统等地层,古隆起长期的暴露,遭受大气淡水淋滤(时间越长,越优),形成厚层的风化壳(图 8),是优质储层形成的主要原因,储层物性整体随埋深增加变差,通过 Y9 井-YLB-A 井及蓬莱地区对比(图 3),自不整合面向下,密度逐渐增大,声波时差减小,储层逐渐变得致密坚硬,电阻率增大,底部由于断裂沟通的深部有机酸使长石等铝硅酸盐等不稳定组分溶蚀,对潜山内部有明显的改善作用,裂缝呈半充填-开启,电阻率呈明显下降趋势。

4.4 浅埋藏,后期成岩影响弱是潜山风化壳储层发育的重要原因

前古近系潜山风化壳型储层经过长期的风化剥蚀,发育溶孔+裂缝复合型储层,具有良好的储

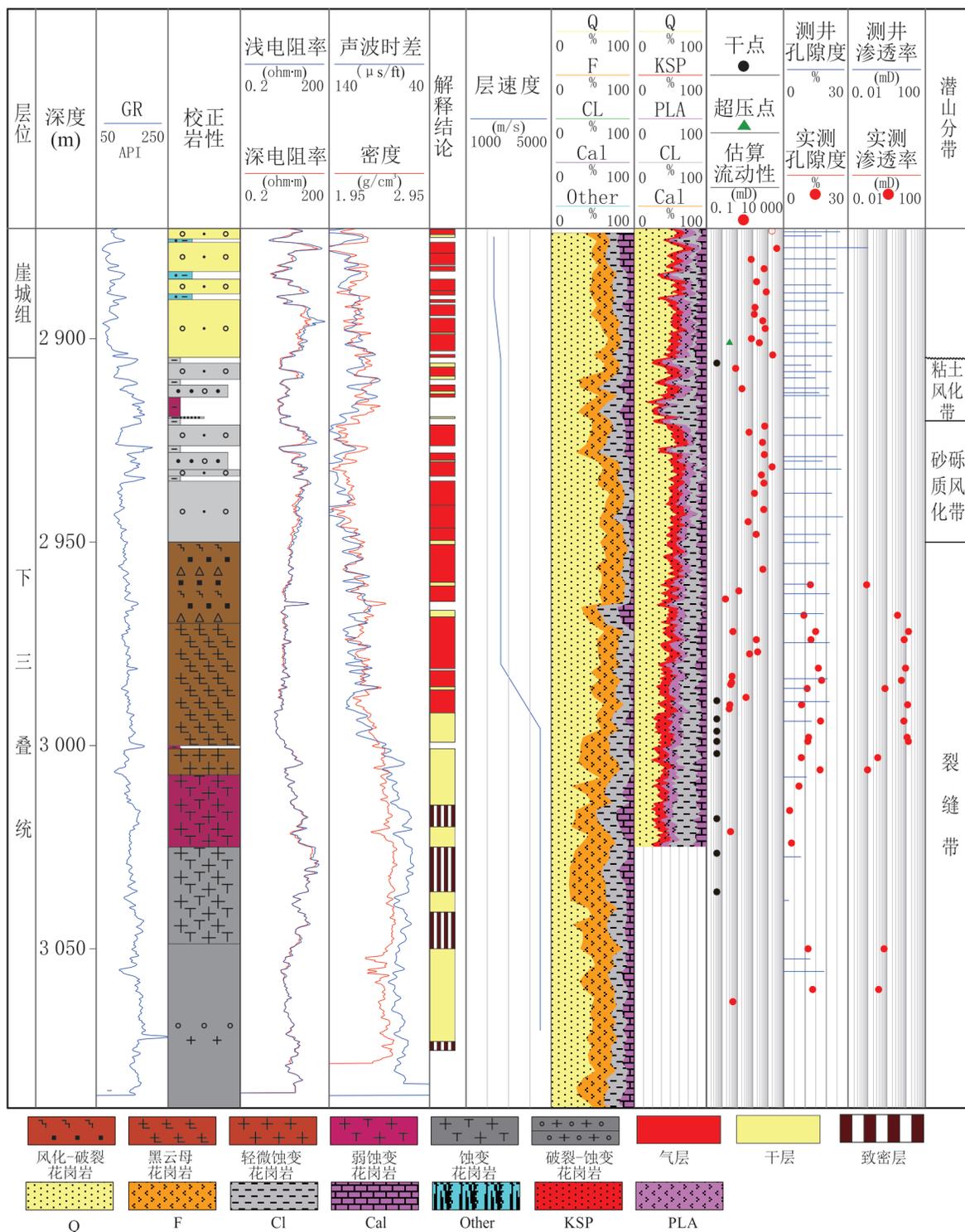


图 7 YLB-A 井储层综合柱状图

Fig.7 Composite columnar section of reservoir of YLB-A

集性, 经过后期埋藏成岩改造, 影响潜山型储层物性. 松南低凸起及周缘, 前古近系潜山型储层, 水深 1 900 m 左右, 去水埋深 1 000 m 左右, 埋藏较浅, 经过后期压实、胶结等成岩作用影响弱, 是潜山风化壳储层发育的重要原因.

5 结论

(1) 松南低凸起及周缘基底发育过铝质—强过铝质花岗岩, 明显负 Eu 异常, 主要形成于三叠纪初期, 推测由于早期挤压构造环境地壳增厚部分熔融

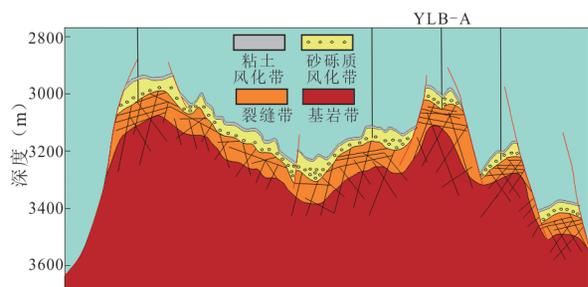


图8 琼东南盆地松南低凸起周缘潜山储层发育模式

Fig.8 The development pattern map of buried hill around Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

作用形成,中侏罗世燕山运动初期抬升,形成三叠纪花岗岩基底与古近系崖城组不整合接触,在长期的风化过程中纵向上明显分带性,随埋深增加依次发育粘土风化带、砂砾质风化带、裂缝带和基岩带。结合常规测井、元素测井、成像测井可很好识别风化壳及纵向特征,风化壳顶端具有明显的低硅钙、高铝铁特征。顶部风化作用强,呈现低密度,高声波时差特征,随着埋深增加,风化程度减弱,密度曲线呈现明显增加的趋势,声波时差减小。

(2)花岗岩潜山发育溶蚀“孔隙+裂缝”双重介质,顶部粘土风化带,有强烈的风化作用,粘土含量高,储集空间以溶蚀孔隙+基质微孔为主,孔喉连通性差,呈现孔高渗低特征,砂砾质风化带,由于强烈的溶蚀作用,以颗粒支撑为主,溶蚀孔隙发育,局部裂缝及微裂缝改善储层渗透性,物性最好;裂缝带,储集空间为溶孔+裂缝复合型,主要以裂缝储集为主,局部发育溶蚀孔隙,随埋深增加储层物性逐渐变差。

(3)琼东南盆地花岗岩基岩发育,为风化壳储层形成提供物质基础,潜山储层发育受风化淋滤强度控制,淋滤形成大量溶蚀孔隙。古地形、节理、断裂展布等控制有效储层平面展布及纵向分布。松南低凸起及周缘长期的古隆起背景及新近系以来拉张背景下应力集中释放区,周缘断裂体系发育,为大气淡水溶蚀及晚期有机酸溶蚀提供良好的通道,形成厚层风化壳,凸起周缘去水深埋深1000 m左右,埋深较浅,经过后期压实、胶结等成岩作用影响弱,是潜山风化壳储层发育的重要原因。

Reference

Deng, Y. H., 2015. Formation Mechanism and Exploration Practice of Large-Medium Buried-Hill Oil Fields in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 36(3):253–261(in Chinese with English abstract).

nese with English abstract).

Fu, S. T., Ma, D. D., Chen, Y., et al., 2016. New Advance of Petroleum and Gas Exploration in Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(1):1–10(in Chinese with English abstract).

Gou, Y. Q., Qian, X., He, H. Y., et al., 2019. Geochronological and Geochemical Constraints on Lizhigou Middle Triassic Felsic Volcanic Rocks in Hainan and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 44(4):1357–1370(in Chinese with English abstract).

He, J. X., Xia, B., Sun, D. S., et al., 2006. Hydrocarbon Accumulation, Migration and Play Targets in the Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 33(1):53–58(in Chinese with English abstract).

Hu, Z. W., Xu, C. G., Yang, B., et al., 2017. Reservoir Forming Mechanism of Penglai 9-1 Granite Buried-Hills and Its Oil Geology Significance in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 38(3):274–285(in Chinese with English abstract).

Huang, J. H., Tan, X. F., Cheng, C. J., et al., 2016. Structural Features of Weathering Crust of Granitic Basement Rock and Its Petroleum Geological Significance: A Case Study of Basement Weathering Crust of Dongping Area in Qaidam Basin. *Earth Science*, 41(12):2041–2060(in Chinese with English abstract).

Ma, L., Liu, Q. X., Zhang, J. L., et al., 2006. A Discussion of Exploration Potentials of Basement Hydrocarbon Reservoir. *Natural Gas Industry*, 26(1):8–11(in Chinese with English abstract).

Ma, X. C., Wang, J. S., Chen, C., et al., 2018. Major Element Compositions and Paleoclimatic Implications of Paleo-Regolith on Top Jingeryu Formation in Fangshan, North China. *Earth Science*, 43(11):3853–3872(in Chinese with English abstract).

Pan, J. G., Hao, F., Zhang, H. Q., et al., 2007. Formation of Granite and Volcanic Rock Reservoirs and Their Accumulation Model. *Nature Gas Geoscience*, 18(3):380–385(in Chinese with English abstract).

Tang, L. S., Zhu, J. T., Yao, Z., et al., 2017. Evolution and Reservoir Formation Conditions of Buried Hills in Songnan Uplift of the Qiongdongnan Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 24(1):87–91(in Chinese with English abstract).

Wang, X., Zhou, X. H., Xu, G. S., et al., 2015. Characteristics and Controlling Factors of Reservoirs in Penglai 9-1 Large-Scale Oilfield in Buried Granite Hills, Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 36(2):262–270(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Wang, Z.F., Li, X.S., Sun, Z.P., et al., 2011. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Exploration Potential in the Deep - Water Region, Qiongdongnan Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 23(1):1—13(in Chinese with English abstract).
- Wu, W.Q., Gao, X.Z., Liu, X.Z., 2014. Formation and Distribution of Basement Rock Reservoir. *Geological Science and Technology Information*, 33(1): 106—113(in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.X., Ma, D.D., Liu, J.L., et al., 2014. Geological Conditions of Basement Oil Pools in Western Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(11): 1689—1696(in Chinese with English abstract).
- Xia, Q.L., 2016. Innovation of Geological Theories and Exploration Discoveries in Bohai Oilfields in the Last Decade. *China Offshore Oil and Gas*, 28(3):1—9(in Chinese with English abstract).
- Xie, X.N., Ren, J.Y., Wang, Z.F., et al., 2011. Difference of Tectonic Evolution of Continental Marginal Basins of South China Sea and Relationship with SCS Spreading. *Earth Science Frontiers*, 22(1):77—87(in Chinese with English abstract).
- Xu, G.S., Chen, F., Zhou, X.H., et al., 2016. Hydrocarbon Accumulation Process of Large Scale Oil and Gas Field of Granite Buried Hill in Penglai 9-1 Structure, Bohai, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 43(2): 153—162(in Chinese with English abstract).
- Xu, X.B., Zhang, Y.Q., Jia, D., et al., 2009. Early Mesozoic Geotectonic Processes in South China. *Geology in China*, 36(3):573—589(in Chinese with English abstract).
- Xue, Y.A., Chai, Y.B., Zhou, Y.Y., et al., 2015. Recent New Breakthroughs in Hydrocarbon Exploration in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 27(1):1—9(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Shi, Y.Y., Jin, W.J., et al., 2008. Discussion on Relationship between Weathering Crust Zonation and Basic Quality Classification of Rock Mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(9):1858—1864(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Wu, H.W., Qu, Y.X., 2001. Comparison of Chemical Indices and Micro-Properties of Weathering Degrees of Granitic Rocks—A Case Study from Kowloon, Hong Kong. *Chinese Journal of Geology*, 36(3):279—294(in Chinese with English abstract).
- Yue, J.P., Zhang, Y., Shen, H.L., et al., 2013. Constraints of Geological Characteristics of the South China Continental Margin on the Basement of Basins in Northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 34(2):120—128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Mi, L.J., Wu, J.F., et al., 2010. Rises and Their Plunges: Favorable Exploration on Directions for Major Fields in the Deepwater Area, Qiongdongnan Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 22(6): 360—368(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Wang, H., Fan, Y.E., et al., 2016. Granite Buried Hill Reservoir Characterization and Modeling: Taking Offshore a Oilfield in Bohai Bay as an Example. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 46(5): 1312—1320(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Xu, X.B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction - Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234—247(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.L., Heng, H.L., Dang, H., et al., 2009. Classic Example Analysis of Fractured Basement Reservoir for Abroad and Exploratory Prospect. *Xin Jiang Geology*, 27(3):251—253(in Chinese with English abstract).
- Zhu, W.L., Wu, J.F., Zhang, G.C., et al., 2015. Discrepancy Tectonic Evolution and Petroleum Exploration in China Offshore Cenozoic Basins. *Earth Science Frontiers*, 22(1):88—99(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓云华, 2015. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践. *石油学报*, 36(3):253—261.
- 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等, 2016. 柴达木盆地油气勘探新进展. *石油学报*, 37(1):1—10.
- 苟琪钰, 钱鑫, 何慧莹, 等, 2019. 海南荔枝沟中三叠世酸性火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义. *地球科学*, 44(4):1357—1370.
- 何家雄, 夏斌, 孙东山, 等, 2006. 琼东南盆地油气成藏组合、运聚规律与勘探方向分析. *石油勘探与开发*, 33(1):53—58.
- 胡志伟, 徐长贵, 杨波, 等, 2017. 渤海海域蓬莱 9-1 油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义. *石油学报*, 38(3):274—285.
- 黄建红, 谭先锋, 程承吉, 等, 2016. 花岗质基岩风化壳结构特征及油气地质意义: 以柴达木盆地东坪地区基岩风化壳为例. *地球科学*, 41(12):2041—2060.
- 解习农, 任建业, 王振峰, 等, 2011. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系. *地学前缘*, 22(1):77—87.
- 马龙, 刘全新, 张景廉, 等, 2006. 论基岩油气藏的勘探前景.

- 天然气工业, 26(1): 8-11.
- 马晓晨, 王家生, 陈燊, 等, 2018. 华北房山景儿峪组顶部古风化壳常量元素地球化学特征及其古气候意义. 地球科学, 43(11): 3853-3872.
- 潘建国, 郝芳, 张虎权, 等, 2007. 花岗岩和火山岩油气藏的形成及其勘探潜力. 天然气地球科学, 18(3): 380-385.
- 尚彦军, 史永跃, 金维俊, 等, 2008. 花岗岩风化壳分带与岩体基本质量分级关系探讨. 岩石力学与工程学报, 27(9): 1858-1864.
- 尚彦军, 吴宏伟, 曲永新, 等, 2001. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比——以香港九龙地区为例. 地质科学, 36(3): 279-294.
- 唐历山, 朱继田, 姚哲, 等, 2017. 琼东南盆地松南低凸起潜山演化及成藏条件, 特种油气藏, 24(1): 87-91.
- 王昕, 周心怀, 徐国胜, 等, 2015. 渤海海域蓬莱 9-1 花岗岩潜山大型油气田储层发育特征与主控因素. 石油与天然气地质, 36(2): 262-270.
- 王振峰, 李绪深, 孙志鹏, 等, 2011. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力. 中国海上油气, 23(1): 1-13.
- 吴伟涛, 高先志, 刘兴周, 2014. 基岩油气藏的形成与分布. 地质科技情报, 33(1): 106-113.
- 吴颜雄, 马达德, 刘君林, 等, 2014. 柴西地区基岩油藏形成的石油地质条件分析. 天然气地球科学, 25(11): 1689-1696.
- 夏庆龙, 2016. 渤海油田近 10 年地质认识创新与油气勘探发现. 中国海上油气, 28(3): 1-9.
- 徐国盛, 陈飞, 周兴怀, 等, 2016. 蓬莱 9-1 构造花岗岩古潜山大型油气田的成藏过程. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(2): 153-162.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等, 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3): 573-589.
- 薛永安, 柴永波, 周园园, 等, 2015. 近期渤海海域油气勘探的新突破. 中国海上油气, 27(1): 1-9.
- 岳军培, 张艳, 沈怀磊, 等, 2013. 华南陆缘地质特征对南海北部盆地基底的约束. 石油学报, 34(2): 120-128.
- 张功成, 米立军, 吴景富, 等, 2010. 凸起及倾没端—琼东南盆地深水区大中型油气田有利勘探方向. 中国海上油气, 22(6): 360-368.
- 张雨晴, 王晖, 范廷恩, 等, 2016. 花岗岩潜山储层裂缝建模表征方法——以渤海花岗岩潜山 A 油田为例. 吉林大学学报(地球科学版), 46(5): 1312-1320.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等, 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234-247.
- 周宗良, 衡海良, 党红, 等, 2009. 国外基岩裂缝油藏实例分析与勘探前景. 新疆地质, 27(3): 251-253.
- 朱伟林, 吴景富, 张功成, 等, 2015. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向. 地学前缘, 22(1): 88-99.